



Sobre la comprobación por cálculo de las columnas de alumbrado

1. Introducción

Como es sabido, el diseño de alumbrado está siendo sometido a un importante proceso de revisión con objeto de homogeneizar los métodos utilizados en los diferentes países de la Comunidad Económica Europea.

Este proceso de codificación abarca detalles geométricos, tolerancias, definición de acciones, métodos de carga, etc., algunos de los cuales se encuentran todavía en discusión.

En este artículo se van a comentar algunos puntos relativos a los métodos de comprobación por cálculo. En particular se comparan las propuestas de la legislación española (ref. 1, 2, 3) con la británica (ref. 5) y algunos esfuerzos comunitarios (ref. 7).

2. Detalles de estructura y acciones

Como es sabido, las acciones incluidas en los cálculos se deben a las dos solicitaciones predominantes: el peso propio y el viento.

Para el cálculo de los valores en el primer caso se utilizan las características nominales de la estructura y se postula una luminaria tipo que, en la última versión española, es de 4.500 cm² y 30 kg de peso.

Aquí aparece un primer punto de discrepancia entre fabricantes y administraciones

locales ya que, en numerosas ocasiones, se considera que estos valores son exagerados. Evidentemente es posible establecer cálculos de comprobación para proyectos en los que las administraciones locales impongan sus propias condiciones, pero también sería preciso disponer de algunas características generales que permitan comparar ofertas económicas en las mismas condiciones mecánicas.

Podría arbitrarse un procedimiento consistente en el análisis estadístico de las características de las luminarias realmente fabricadas y establecer el valor con una cierta (pequeña) probabilidad de ser superado, tal como se hace para establecer los valores característicos.

La figura 1 recoge los resultados parciales facilitados por un fabricante de luminarias.

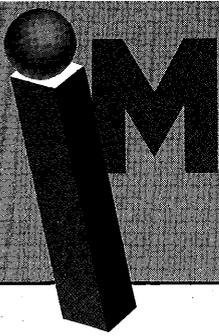
Como puede verse, en este caso los valores característicos serían:

Peso: 24 kg.

Área de exposición: 2.782 cm²,

que están, ciertamente, por debajo de los valores recomendados.

Por otro lado, los valores de las cargas equivalentes a la acción del viento se encuentran perfectamente regulados (ref. 3). En la fórmula correspondiente al paso de velocidades a cargas se tienen en cuenta factores modificadores de la velocidad del viento con la altura, influencia de las proporciones relativas del fus-



te y amplificación dinámica por vibración.

Se trata pues de unas recomendaciones muy completas en las que, no obstante, aparece un factor (k), dejado a la discrecionalidad de cada nación, que modifica al alza los valores de las presiones básicas. El procedimiento de fijación de k está directamente relacionado con el mapa eólico del país que, como es sabido, se encuentra cuestionado en estos momentos. Aquí también sería deseable una investigación especializada por parte de los organismos competentes. Pese a que todos los fabricantes se encuentran en igualdad de condiciones ante esta incertidumbre, el conocimiento adecuado de este factor no es sólo de interés académico, sino que está relacionado con la adecuada asignación de recursos económicos.

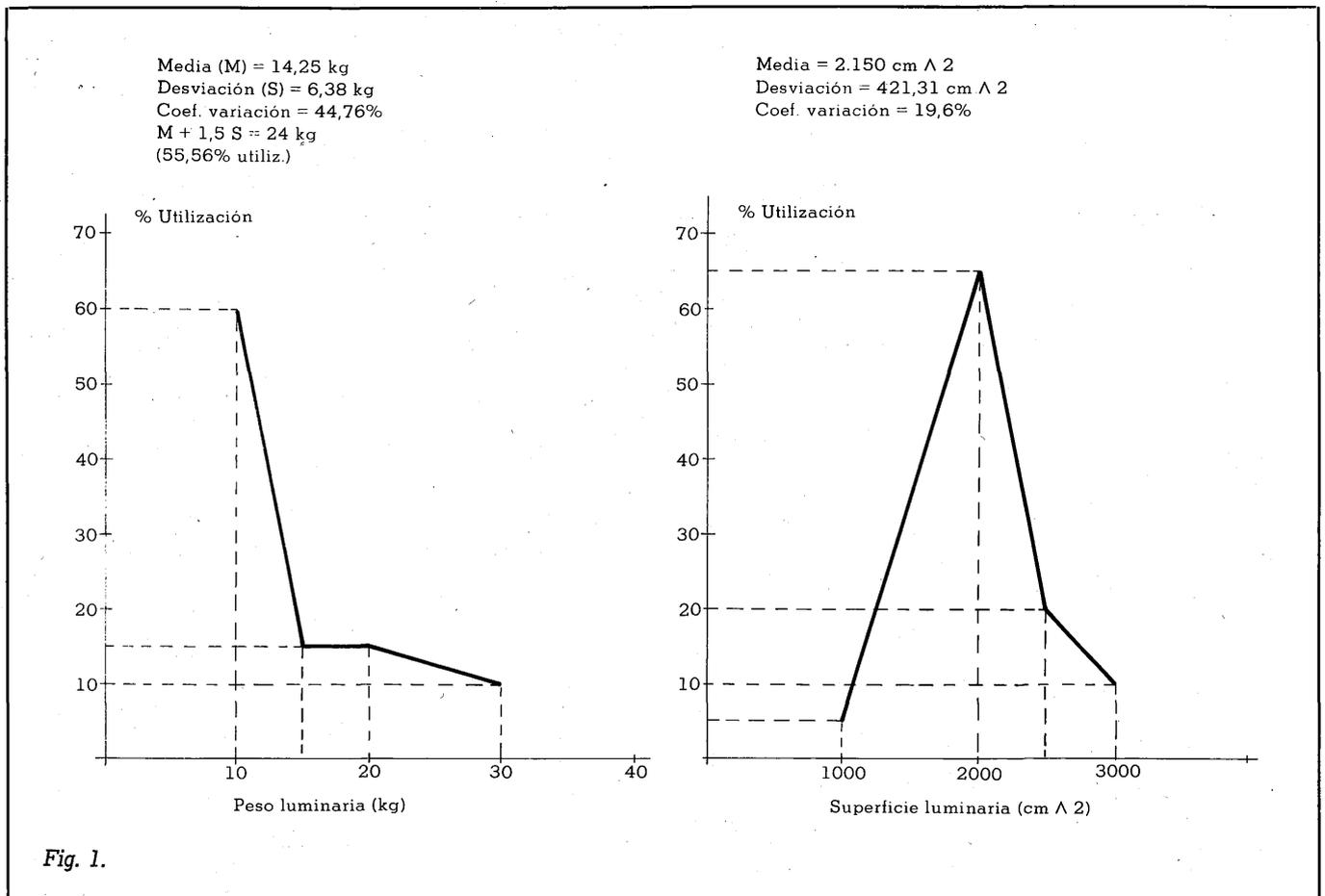
Una vez determinadas las acciones se introducen en el modelo de la estructura que, generalmente, se resuelve con un procedimiento computerizado. Las recomendaciones internacionales utilizan una discretización (o como se indica con expresión poco afortunada, división en secciones) con elementos de no más de 2 m de longitud en los que es posible suponer que las acciones son constantes. Esta malla se refina en las proximidades de las perforaciones del registro, para adaptarse a su tamaño, y en los brazos curvos para aproximar la geometría con la suficiente precisión.

Conviene aquí algún comentario sobre la dificultad real de conocer el estado tensional; en principio se trata de un esquema bien sencillo: una estructura tubular de pared delgada asimilable a una viga de Euler-Bernoulli. Sin embar-

go, tan pronto como aparecen las perforaciones del registro, el panorama cambia por completo y surge la necesidad de utilizar una teoría mucho más fina que permita reflejar el desplazamiento del centro de esfuerzos constantes en la sección abierta, el pandeo del borde libre de una lámina cilíndrica, las concentraciones de tensión en las esquinas del agujero, las posibles plasticificaciones locales, etc.

Carecen pues de sentido las invocaciones, que a veces se escuchan, a los "buenos viejos tiempos" en los que el cálculo de un báculo se realizaba en dos renglones de números.

Lo que está detrás de los métodos de comprobación por cálculo es el diseño económico de los báculos compatible con un margen de seguridad prefijado y, para ello, se necesita un estudio muy cuidadoso.



En el punto que sigue se recoge la visión personal de los autores sobre la situación actual.

3. Método de comprobación por cálculo

La parte 7 de la Normativa Europea se refiere a este punto. Desde hace algunos años el Comité encargado de su redacción se encuentra dividido por opiniones contradictorias y se muestra incapaz de emitir una solución unitaria. Ello se puso una vez más de manifiesto en las reuniones mantenidas el pasado mes de abril en Madrid. En este apartado se van a comentar los puntos conflictivos e indicar lo que se cree puede ser una línea de actuación.

Una Norma de cálculo debe, como mínimo, resolver los siguientes dilemas:

1. Filosofía de establecimiento de la seguridad.
2. Métodos de cálculo adecuados a la estructura específica.
3. Regla de interacción de esfuerzos.

Hasta el momento tan sólo la Administración británica ha avanzado una propuesta, aplicable en su propio territorio, que contesta con espíritu actual a las preguntas anteriores, y por ello en lo que sigue se harán referencias continuadas a la misma.

3.1. Filosofía de establecimiento de la seguridad

Como es sabido, el método tradicional de establecimiento

de la seguridad es el llamado "en tensiones admisibles" en que se supone la estructura trabajando en régimen elástico, lo que permite determinar un valor máximo de tensión $\tau_{m\acute{a}x}$ que se compara con el obtenido al dividir una tensión típica del material (vg: la tensión de límite elástico) por un "coeficiente de seguridad" η establecido en base a la experiencia. El panorama se complica cuando aparecen efectos especiales como abolladuras, alabeos de la sección, etc.

Por contra, desde los años 50 se ha abierto camino la filosofía del cálculo en Estados Límites que arranca del reconocimiento del carácter probabilista de cargas y acciones y establece (vg. ref. 9) una serie de estados límites, tanto en situación de servicio como última, frente a los que se debe

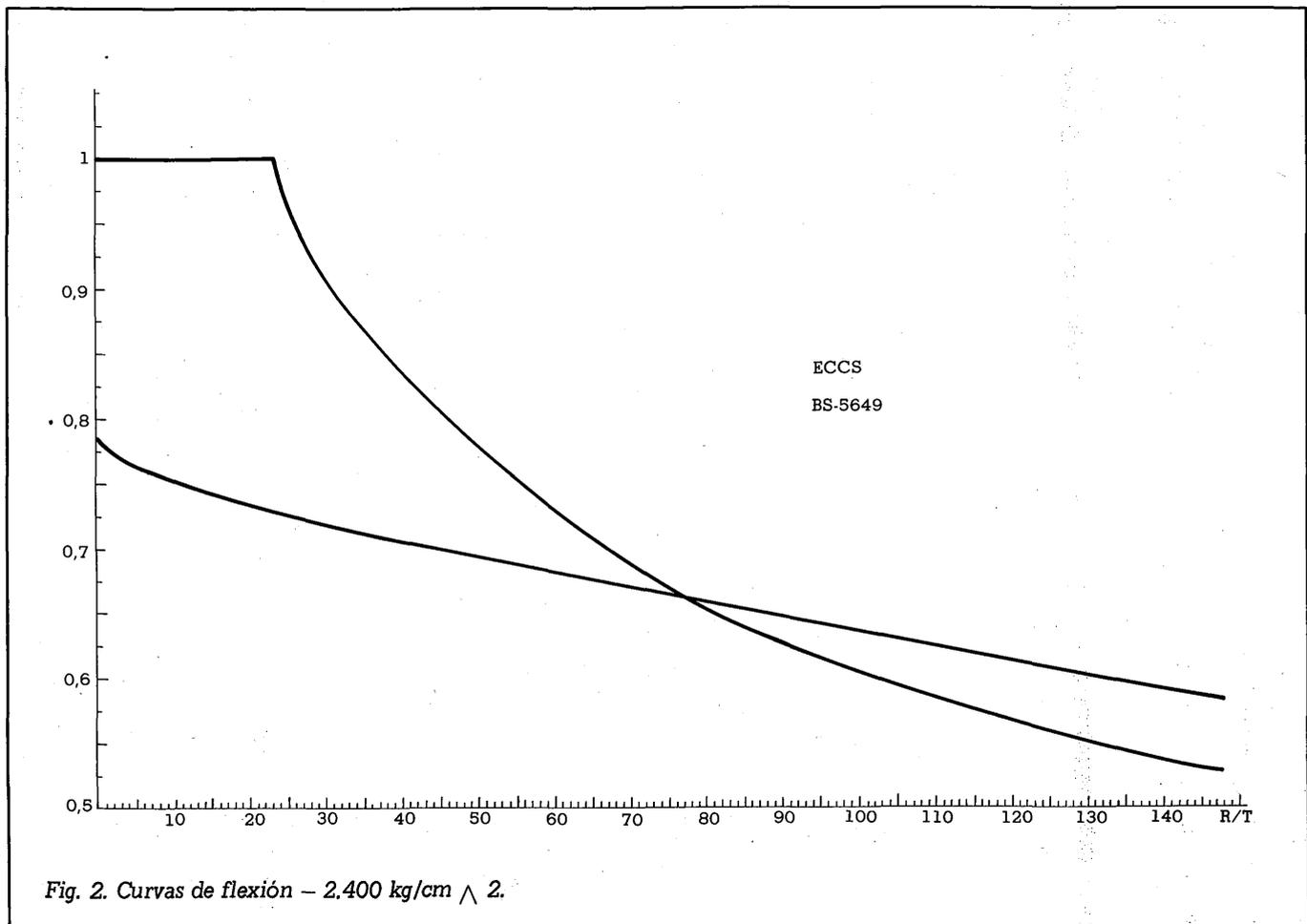
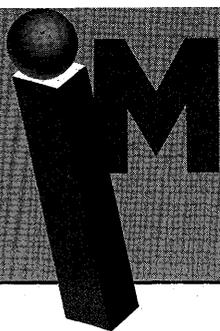


Fig. 2. Curvas de flexión - 2.400 kg/cm \wedge 2.



establecer la seguridad correspondiente. Esta filosofía ha sido adoptada por las Normas españolas de estructuras de acero y de hormigón y, además, forma la base conceptual de los llamados Eurocódigos que van a regular las construcciones en el ámbito comunitario.

Pese a esta tendencia tan marcada, existe una discusión de fondo entre los componentes del Comité Internacional encargado de la Normalización que no acaba de decantarse por uno u otro procedimiento. Por ello, la administración británica decidió avanzar una propuesta en el sentido de utilizar el método de Estados Límites acorde con las tendencias señaladas.

Los autores consideran que éste es el marco adecuado para el planteamiento de las

reglas de comprobación, aunque disienten de la normativa británica en los aspectos relacionados con los coeficientes de ponderación de la combinación de acciones y en la regla propuesta para la combinación de esfuerzos, según se indicará más abajo.

Como es sabido, el planteamiento puramente probabilista está basado en controlar la probabilidad de fallo para cada estado límite, lo que a su vez exige el conocimiento de las distribuciones de probabilidad correspondientes. Como el manejo puede ser farragoso, el planteamiento se simplifica utilizando un "formato de cálculo" basado en la ponderación de las acciones y las resistencias, de tal modo que se controlen indirectamente los márgenes de seguridad.

En la estructura de colum-

nas o candelabros, la cargas más importantes son el peso propio y el viento por lo que el formato de cálculo tiene el siguiente aspecto:

$$\phi R \geq \gamma_E (\gamma_{PP} PP + \gamma_w W)$$

siendo R la magnitud característica de la resistencia del material (generalmente la tensión de límite elástico τ_e) y ϕ un factor minorador de la misma que tiene en cuenta las incertidumbres que gravitan sobre aquélla. PP y W representan respectivamente los efectos de peso propio y viento siendo γ_{PP} y γ_w los correspondientes factores de mayoración y γ_E un factor que introduce las incertidumbres del modelo de cálculo.

En líneas generales se puede decir que los γ dependen del tipo de distribución de proba-

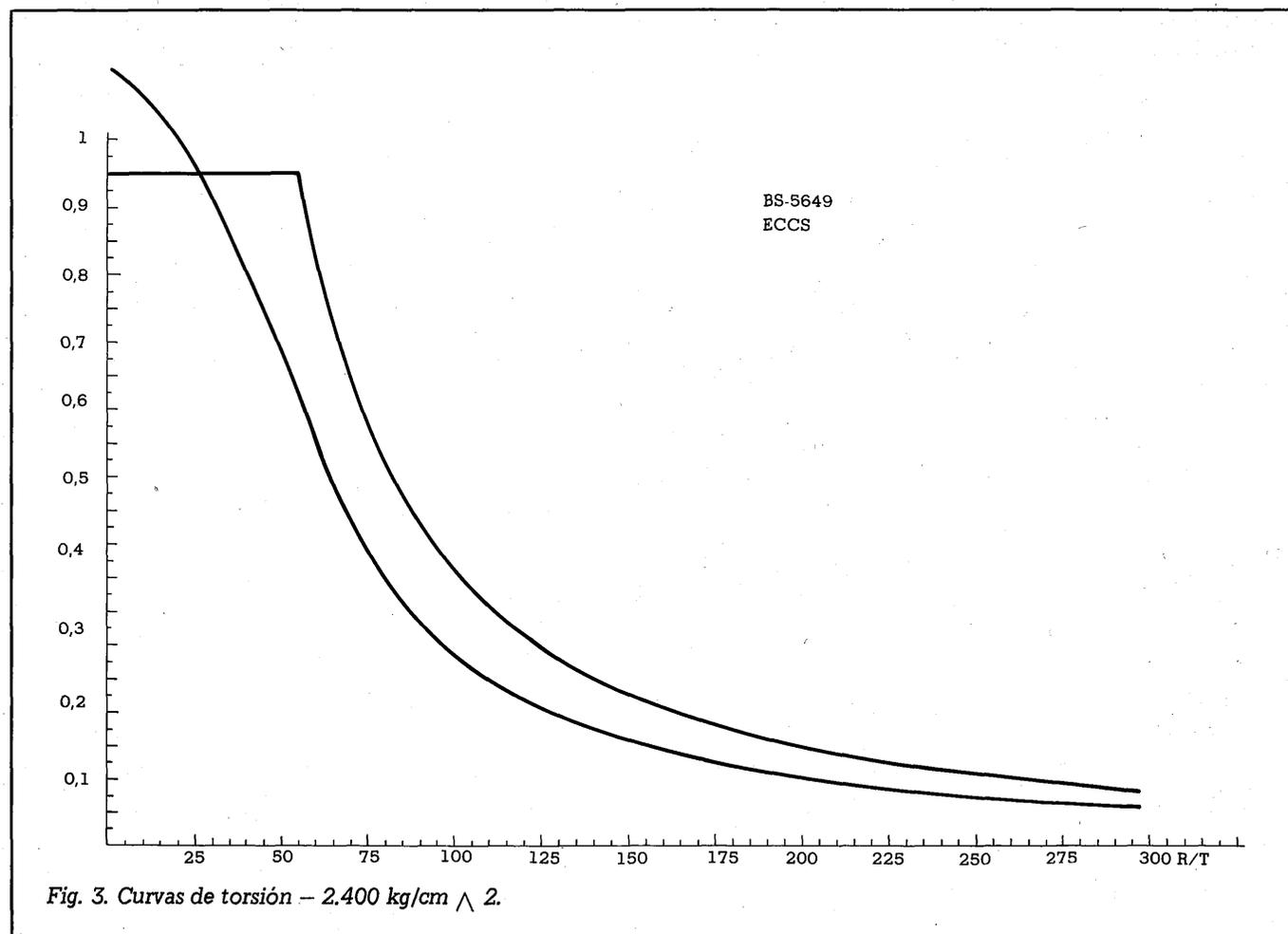


Fig. 3. Curvas de torsión - 2.400 kg/cm \wedge 2.

bilidad escogido, del coeficiente de variación v de la misma (recuérdese que v es el cociente entre la desviación típica y el valor medio de la distribución de probabilidad) y del índice β de fiabilidad que se quiera imponer a la construcción.

En la referencia 9 se ha realizado una estimación de los valores más adecuados de los coeficientes, que corresponde a la elección de un índice de fiabilidad $\beta = 3$ equivalente a la elección de una probabilidad de fallo del orden del 1,85 por mil, que es la habitual en edificación.

Los coeficientes de variación y los tipos de distribución empleados para cada uno de los factores precitados han sido los siguientes:

3.1.1. Resistencia

El modelo adoptado es la distribución normal. Se supo-

nen los siguientes factores y coeficientes de variación:

Propiedades mecánicas del material $v = 10\%$.

Procesos de fabricación $v = 8\%$.

Modelo de medio continuo, comportamiento elasto-plástico, etc. $v = 8\%$.

El coeficiente de variación global es así $v_R = 15,1\%$.

3.1.2. Modelo de la estructura

Se supone que la distribución de incertidumbres está regida por la ley Logarítmico-Normal y que recoge las aproximaciones relacionadas con la discretización (asimilación de las partes curvas a trozos rectos, características tomadas en el centro de los elementos), hipótesis de pequeños desplazamientos, paso de cargas a efectos de las cargas (esto es a esfuerzos y distribución de tensiones), etc. Se

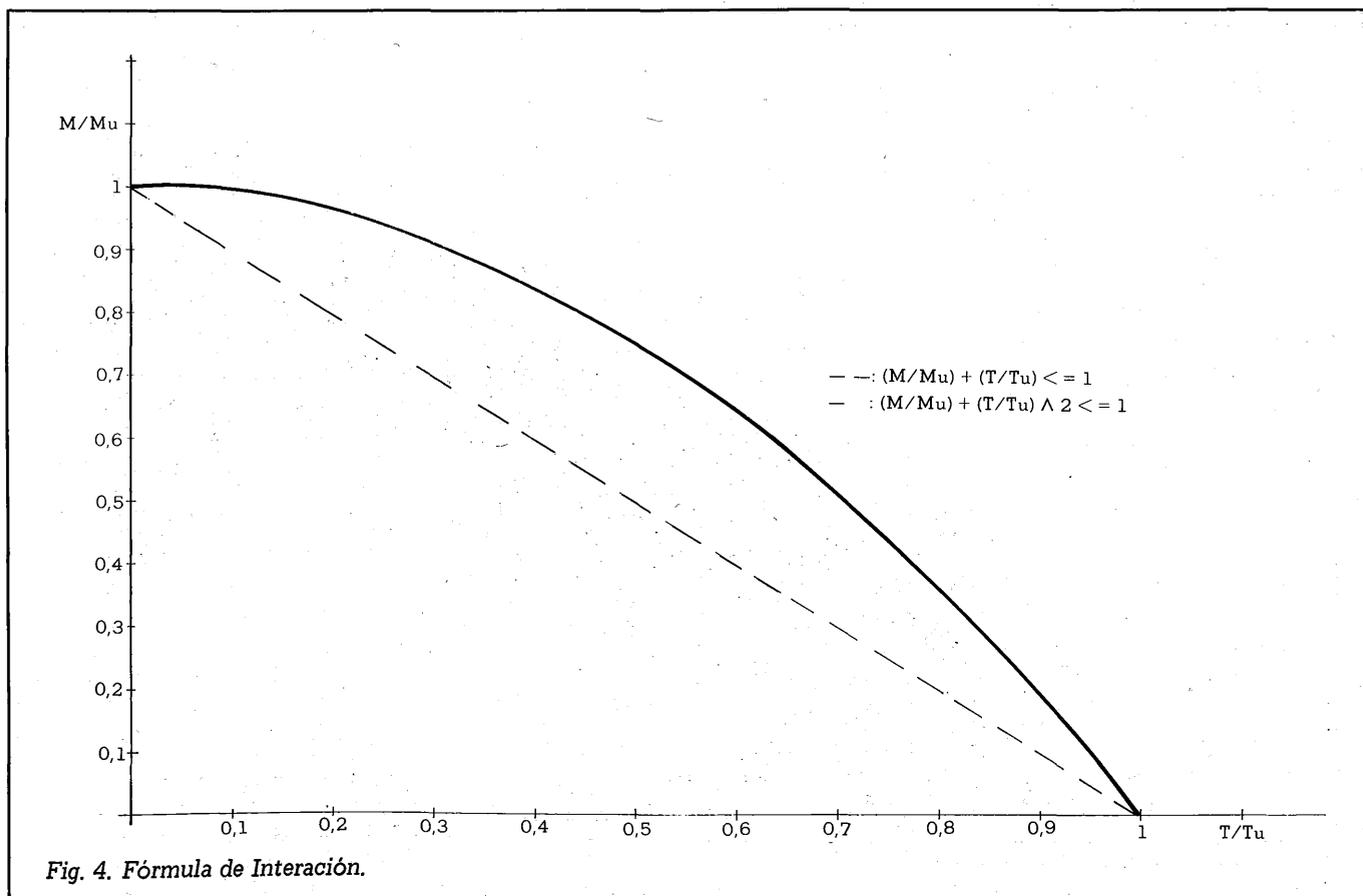
admite un coeficiente de variación $v_E = 8\%$.

3.1.3. Peso propio

Se considera que la distribución de peso propio está regida por una distribución normal y que el control sobre el mismo es relativamente bueno (recuérdese sin embargo la discusión sobre el peso de la luminaria), por ello se estima un coeficiente $v_{pp} = 8\%$.

3.1.4. Viento

La distribución asumida es la Logarítmico-Normal. Debido a las reticencias sobre la exactitud del mapa de vientos español se considera un coeficiente de variación $v_{mava} = 19\%$. Por otro lado, el paso de velocidades a presiones introduce interrogantes respecto a los coeficientes C y al sistema





empleado por la norma de acciones que, no obstante, se considera bastante precisa por lo que el coeficiente de variación por esta causa se estima del orden del 6%. En conjunto el coeficiente de variación para el viento es $V_w = 20\%$.

Teniendo en cuenta los valores anteriores y la teoría de fiabilidad, al agrupar los coeficientes resultantes, se obtiene (referencia 9) la relación:

$$R \geq 1,329 PP + 1,47 W$$

que es prácticamente la recomendada por la norma MV-103.

Los valores equivalentes de la Norma Británica serían $1,1 \times 1,15 = 1,27$ (ó $1,1 \times 1,30 = 1,43$ para aceros con una elongación menor del 5% que, como se ve, son algo menores y adolecen de una inconsistencia básica: ponderan por igual el efecto del peso propio y el del viento, a pesar de las incertidumbres mucho mayores que afectan a este último.

3.2. Fórmulas de cálculo

El segundo punto de importancia que surge al tratar de establecer la comprobación por cálculo es el establecimiento de fórmulas adecuadas para la comprobación.

En general, la comprobación en tensiones se limita a la del estado límite último y se supone que la limitación en servicio corresponde a los desplazamientos. Es difícil establecer unos criterios para esta última: por un lado, la vibración del báculo debe ser a una frecuencia baja para evitar perjuicios a la luminaria, lo que conduce a admitir grandes desplazamientos. Por otro lado, éstos deben ser lo suficientemente limitados para que la puesta de las ecuaciones de equilibrio en la estructura sin deformar, base de todos los cálculos elásticos, no introduzca errores apreciables en

la magnitud de los esfuerzos. Esta condición se podría establecer mediante una relación del tipo

$$M_H \leq 0,10 M_w$$

donde M_H fuese el incremento de momento de las cargas verticales al tener en cuenta el desplazamiento horizontal y M_w el momento inducido por las cargas de viento en la base de la estructura. En líneas generales el 4% de la altura no parece presentar problemas de cálculo, aunque algunos autores (ref. 8) lo consideran excesivo.

Respecto a la comprobación de tensiones, la Norma Británica ha decidido asimilar el problema de pandeos locales a la comprobación en tensiones, tal como hace también la referencia 7.

Al respecto conviene distinguir los casos de sección cerrada y sección de registro. En los primeros es posible comparar, tal como se hace en la figura 2 las fórmulas británicas y ECCS. Como puede observarse, ambas son prácticamente iguales aunque hay zonas de mayor conservadurismo. Desde la modernidad de las normas ECCS y su grado de acuerdo internacional podría recomendarse su uso en el convencimiento de que las normas británicas son igualmente válidas. Respecto al estudio de las secciones de registro con y sin perforación, la propuesta inglesa es única y, aparentemente, está basada en una amplia experimentación a nivel de laboratorio y una sustanciación teórica dirigida por el profesor Horne. Los coeficientes reductores propuestos parecen razonables y por ello podrían ser utilizados, tomando un valor $\gamma_m = 1$, en conexión con la hipótesis de carga patrocinada más arriba.

3.3. Diagrama de interacción

Las fórmulas de cálculo están

basadas en esfuerzos, momentos flectores y torses, últimos. Para contrastar su seguridad se colocan los puntos representativos en un diagrama adimensional como el de la figura 3. El diagrama propuesto por la norma británica es el lineal

$$\frac{M}{M_n} + \frac{T}{T_n} \leq 1$$

mientras que algunos autores recomiendan una ley parabólica

$$\frac{M}{M_n} + \left[\frac{T}{T_n} \right] \leq 1$$

Como puede verse, este último es menos rígido y permite incrementos de valores importantes (figura 4). Así, un momento flector del 50% del último podría ser combinado con un torsor del 50% en el caso de la norma británica y con aproximadamente un 70% en el caso parabólico.

Igualmente, un torsor del 20% del último podría ser combinado con prácticamente el 100% del flector último mientras que la norma británica sólo permitiría un 80%.

Las incertidumbres recogidas en el coeficiente que afecta al modelo matemático son, en opinión de los autores, suficientes para evitar tener que añadir un nuevo grado de conservadurismo en la fórmula de interacción.

5. Conclusiones

El método de comprobación de la seguridad de los candelabros mediante cálculo es, todavía, un tema abierto a nivel internacional.

En opinión de los autores, un posible código español debería estar basado:

a) En un enfoque en Estados Límites congruente con el resto de la normativa española y

los Eurocódigos recientemente elaborados.

b) La norma inglesa BS 5649-7 es una base aceptable para el establecimiento de la Norma Española si se acepta la sustitución de los coeficientes de ponderación por los recomendados en la Norma MV-103 y se sustituye la fórmula de interacción lineal por otra parabólica.

c) Sería muy importante el establecimiento de las características de la luminaria tipo de acuerdo con los datos de uso. En particular sería deseable relacionar las limitaciones de flecha con la funcionalidad de la luminaria.

6. Referencias

1. R.D. 2642/1985. B.O.E. n.º 21.
2. O.M. 11-07-86. B.O.E. n.º 173.
3. Normas UNE: 72-401-81; 72-402-80; 72-403-84; 72-404-84; 72-405-85; 72-406-84; 72-408-84; 72-409-84.
4. Reppost CEN, CR 40-7. Mayo 1984.
5. Normas BS 5649, parte 7.
6. M.S. Gómez y R. Alvarez: Algunos aspectos del Análisis estructural de candelabros. Re-

vista Sercorueta. Año 2.º, n. 7, pp. 7-12.

7. European convention for surestructural steelwork. "Buckling of Steel Shells". European Recommendations ECCS 1988.

8. J.I. Urraca Piñeiro: "Tratado de alumbrado público". Editorial Donostiarra, S.A., 1988.

9. M.S. Gómez, M.C. Huerta, E. Alarcón: "Recomendaciones para una posible Norma Española de Candelabros". Sociedad de Investigación, Estudios y Experimentación 1989.